

建築構造計算における耐震性に関する精度と不確定性の評価

Effect of diversity and variability of structural calculation
on seismic safety evaluation

学籍番号 56843
氏名 元井 健太 (Motoi, kenta)
指導教員 神田 順 教授

1 はじめに

建築物の構造工学において、設計における制約と評価における制約は必ずしも十分な議論がなされてこなかった。

「設計」における制約とは設計者の技術のレベルに差があることであり、前提条件である地盤や材料のばらつきをどの程度考察するかという精度の問題であり、また、被災や技術的な発展に対する設計基準の更新の必要性である。これらの制約を踏まえ、建築基準法では一つの計算法への収斂ではなく、告示によって多様な計算を認める方向へと進んでいる。近年、2000年の告示では性能規定への対応から限界耐力計算が、2005年にはエネルギーの釣合いに基づく耐震計算等がそれぞれ導入された。ここでは、計算法相互での建物安全性の程度が同じであるのか、あるいは差があるのかという点が問題となる。

次に、構造安全性の「評価」に対する制約にふれる。評価においては設計の場合と比較して、極めて短時間で大量の建物に対して評価を行なう必要がある。また、評価者と評価の枠組みに広く対応できる形でなければならないということである。評価者というのは、一般的に構造安全性に関しては専門家によって調査が行なわれることが

前提とされてきたが、これを一般の建物利用者や販売者にも判断が可能である指標とすることである。さらに、不動産の証券化の際に見られるように他分野の多面的な評価と協同して利用できる形とすることが望まれる。不動産の証券化では証券の発行にあたって、ライフサイクルコストや耐震安全性、環境リスクなどを評価した物的調査、建物の権利関係などに関する法的調査、過去の建物の収入・支出を調べた経済的調査が行なわれ、デュー・ディリジェンスと呼ばれている。ここでは建物安全性としてPMLという指標が用いられているが、他の要素と合わせて評価が可能であり、構造工学の知識を導入している指標である点が注目される。

建築構造工学では建物の耐力と外力の大きさをそれぞれ評価し、その大小関係によって安全性に対する保証を行なっている。これは設計でも、評価でも同様である。しかし、これまでみた制約により設計と評価における統一的な手法は実現していない。したがって、同じ枠組みで行なわれているにもかかわらず設計する際にコストが発生し、さらに評価する際にもコストが発生するため特に一般の人に建物の評価は近寄りがたいものとなっていた。本研究では前述

の PML を設計における設計者の選択から導出する方法を提案する。同時に、この手法によって一般の人の評価が設計者の精度や計算法の決定といった意思決定に対してフィードバックを行なえるようになる可能性がある。

2 構造計算におけるばらつきの考察

まず、構造計算におけるパラメータ設定の精度や構造計算法が建物の安全性に及ぼす影響について事実の確認を行なう。

2.1 パラメータによるばらつき

必要保有水平耐力計算、限界耐力計算、時刻歴応答計算についてそれぞれの計算法におけるばらつき要因を考察する。

表1はそれぞれの計算法における建物耐力と荷重条件に関する設定の違いが示されている。本論文で取り扱った3種の計算法においては時刻歴応答計算に対して、限界耐力計算と同様の仮定をおくことによって建物の耐力設定条件を揃えている。

計算法全体に影響する耐力全体のばらつきとしては材料が持つばらつき、荷重増分解析における計算条件、ヒューマンエラーがある。

計算法によって大きく異なる荷重の設定について特に影響が大きいと考えられるのが建物敷地における表層地盤の取り扱いである。必要保有耐力計算および限界耐力計

算の簡略法では地盤を大きく第一種、第二種、第三種地盤の3種類として考えるのに対して、限界耐力計算の詳細法および時刻歴応答計算では表層地盤の層厚、密度、せん断波速度、砂質（粘土 or 砂）、せん断ひずみ、工学基盤の密度、せん断波速度のばらつきが地盤増幅の評価に影響する。加えて、せん断波速度は標準貫入試験により簡単に得られるN値からの換算式が多く示されており、この換算式における評価の違いもせん断波速度のばらつきに影響するものと考えられる。

6種のモデル地盤と6層と12層のモデル建物を用いて、地盤パラメータのばらつきが限界耐力計算の要求加速度に及ぼす影響を考察した。図1に、6層建物に関する結果を示す。ここで示した図は要求加速度の累積密度関数となっている。地盤により要求加速度が大きく異なることがわかる。

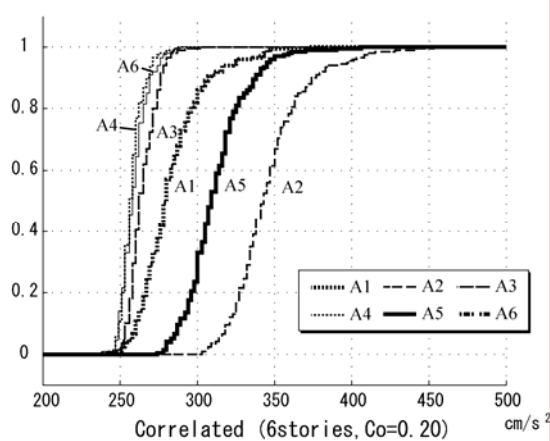


図.1 地盤パラメータのばらつきの影響

表1 構造計算法における条件の取り扱いについて

		建物耐力	地震荷重の設定			
			基準スペクトル	鉛直方向の荷重分布	地盤の増幅	用途
時刻歴	必要保有水平耐力計算	荷重増分解析	一定値	Ai分布(せん断力)	地域係数	考慮しない
	限界耐力計算	荷重増分解析	法令による規定	Bsi分布(加速度)	Gsによる増幅の設定	考慮しない
	時刻歴応答計算	荷重増分解析/質点モデルの時刻歴応答	限界耐力計算の基準スペクトルに合わせて作成	等価質点モデルによる	重複反射理論	考慮しない
性能	耐震診断	Is値(形状・経年・強度・靱性)による推定	一定値	階数と当該階の位置で決まる係数	地域係数・地盤指標	用途係数
	PML	荷重増分解析/被害データ/Is値 etc	確率論的推定/ 断層破壊シナリオの設定 etc		GISデータ	考慮しない

2. 2 異なる構造計算法の比較

異なる構造計算法によってどのような違いが生ずるかについて耐力比および信頼性指標を用いて定量的な比較を行なった。パラメータのばらつきを考察に利用した6層と12層の建物モデルおよび6種の地盤に対して考察を行なった。図2に比較のフローを示した。

耐力比としては要求耐力に対する保有耐力の割合として、以下のように定義した。

$$\frac{Q_c}{Q_{rec}} \quad (1)$$

ここで、必要保有耐力計算においては Q_c は建物保有水平耐力、 Q_{rec} は必要保有水平耐力である。また、限界耐力計算および時刻歴応答計算においては耐力比をせん断力-変位図において、図3のように定義した。

図4に6層建物の2つの断面に対する耐力比を示す。耐力比は1を超えると建築基準法基準を満たしていることになるので、図4より同一の建物断面であっても構造計算法によって基準を満たしていたり、満たしていなかったりするという状況がある。

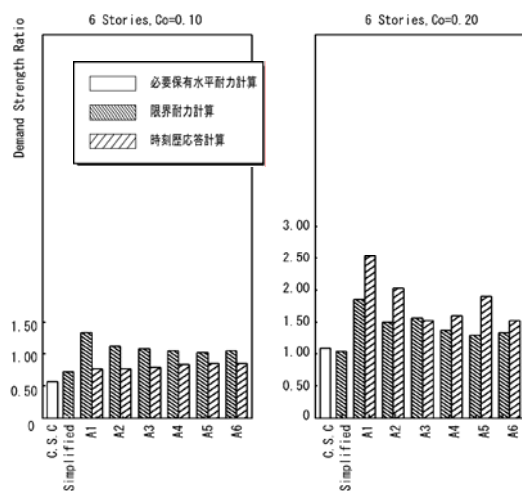


図.4 6層 Co=0.10, 0.20 耐力比

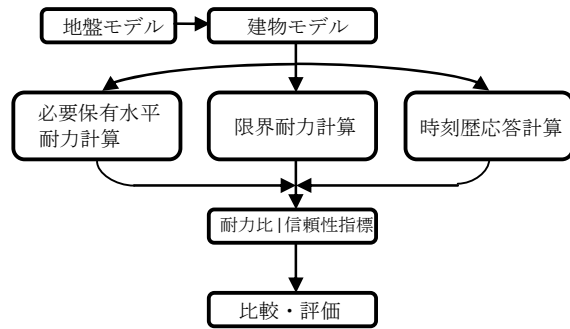


図.2 比較のフロー

信頼性指標は建物の破壊確率 P_f を用いて以下のように表せる指標である。

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (2)$$

ここで、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規確率分布関数である。信頼性指標における比較においても耐力比と同様の計算法の結果に対する差異が観察された。図5に12層の結果を示す。

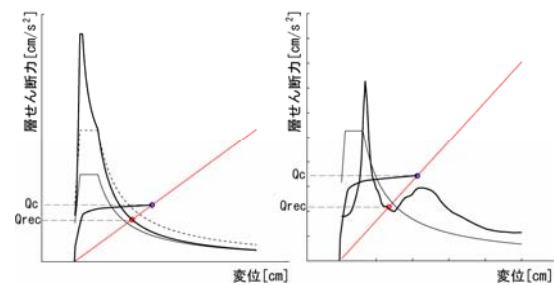


図.3 限界耐力計算(左), 時刻歴応答計算(右)

における耐力比

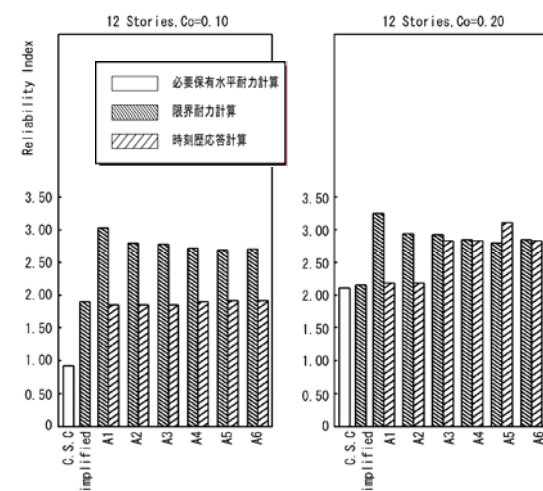


図.5 12層 Co=0.10, 0.20 信頼性指標

3 PMLによる設計の評価

PML(Peak Maximum Loss：予想最大損失額)とは「50年間に10%を超える確率で起こることが予想される地震動による予想最大被害の90%点の再調達費用に対する割合」である。

PMLの算出にあたって以下の情報が必要となる。

- (1) 評価する土地における地震動強さと発生確率の関係（ハザードカーブ）
- (2) 地震動強さと被害度別の被害率の関係（フラジリティカーブ）
- (3) 地震被害度別の被害費用と建物の再調達費用

以上の情報から図6のように年発生確率をY軸と再調達費用に対する被害費用をX軸にプロットしたものがリスクカーブと呼ばれる。

本研究では、耐力比を耐震診断値である I_s 値に読み替えて(2)で I_s 値を基に示されているフラジリティカーブに代入し(図6参照)、PMLの計算に取り込む事で構造計算の精度をPMLで示した。

6層、 $C_0=0.20$ の建物に関して、計算法の比較を行なったところ、許容応力度等計算のPML値が、限界耐力計算による

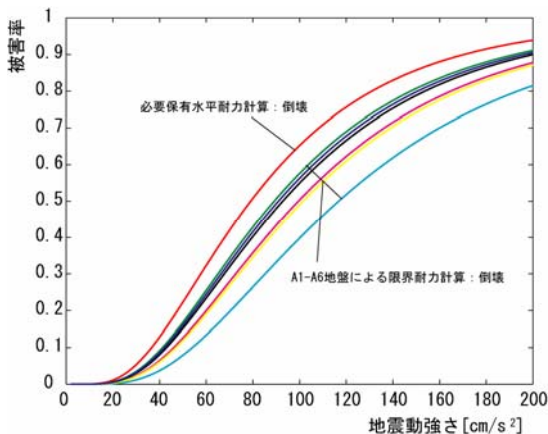


図.6 フラジリティカーブ

PMLが～程度、時刻歴応答計算によるPMLが～程度となった。これは詳細度の高い計算法ではばらつきを適切に考慮できるため、平均的なレベルとしては低く評価されていても確率論的な意味での安全性は確保できることが暗に示されている。

4 構造安全性指標の必要性について

PMLは地震保険や不動産の証券化などで使われるが、一般の中古住宅取引においてはなじみが薄い。建物の長寿命化において中古住宅市場の発展が望まれる。このために地震リスクの情報に関する偏りは望ましくない。誰にでも公平にアクセスできる地震リスク評価が望まれる。

5 まとめ

本研究ではこれまで専門家による協力によらなければ得られなかった建築物の安全性評価(PML)を、構造設計における設計者の判断(設計法・パラメータの設定)と結びつけることで新築時に予測できるようにした。これにより、構造計算における精度の問題を一般の人が評価しやすい形で提示することが出来るようになった。本研究により安全性の評価に対する社会的な公平性が高まった。

- 1) Ellingwood B., Kanda, J., "Structural Safety and Its Quality Assurance", ASCE, 2005, pp.4-13
- 2) 花岡郁哉：改正建築基準法施行令・告示の設計荷重による構造安全性，東京大学2000年修士論文
- 3) 神田順ほか：損失費用モデルを用いた最適信頼性に基づく設計用地震荷重，研究報告書1998.6
- 4) (財)建築・設備維持保全推進協会：デュー・ディリジェンスとエンジニアリング・レポート